

## 양방향수전해 기반 수소제조용 초고온스팀 생산시스템의 엑서지 분석

한단비<sup>1</sup> · 박성룡<sup>2</sup> · 조종표<sup>2</sup> · 백영순<sup>1,†</sup>

<sup>1</sup>수원대학교 환경에너지공학과, <sup>2</sup>한국에너지기술연구원

### Exergy Analysis on the System of Superheated Steam (700°C, 3 atm) Production for the Reversible Electrolysis: Based Hydrogen Production

DANBEE HAN<sup>1</sup>, SENGRYONG PARK<sup>2</sup>, CHONGPYO CHO<sup>2</sup>, YOUNGSOON BAEK<sup>1,†</sup>

<sup>1</sup>Department of Environment-Energy, The University of Suwon, 17 Wauan-gil, Bongdam-eup, Hwaseong 18323, Korea

<sup>2</sup>Korea Institute of Energy Research, 152 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34129, Korea

†Corresponding author :  
ysbaek@suwon.ac.kr

Received 15 June, 2018  
Revised 23 June, 2018  
Accepted 30 June, 2018

**Abstract >>** Hydrogen can be produced by reforming reaction of natural gas (NG) and biogas, or by water electrolysis. In this study, hydrogen production through water-electrolysis needs superheated steam above 700°C for high efficiency. The production method of hydrogen like this was recommended for the 4-type processes for superheated steam (700°C, 3 atm) by Bio-SRF combustion furnace. The 4-type processes to produce superheated steam at 700°C from the heat source of SRF combustion furnace was simulated using PRO II. The optimum process was selected through exergy analysis. The difference of process 1 and 2 is to the order of depressure and heating process to change 180°C and 7 atm to 700°C and 3 atm. Process 3 and 4 is to utilize 25% of steam to generate superheated steam and remaining to use for the power generation by steam generator.

**Key words :** Reversible electrolysis(양방향 수전해), H<sub>2</sub>(수소), Hydrogen production (수소생산), Super-heated steam(초고온스팀), Optimization process(공정 최적화), Exergy(엑서지)

### Nomenclature

U : Internal energy  
s : Entropy  
h : Enthalpy  
m : Mass flow (kg/hr)  
e : Exergy (kJ/kg)  
E : Exergy (kJ/hr)

### Subscripts

0 : reference of standard (25°C, 101.3kPa)  
S : stream in process simulation system

### 1. 서론

전 세계적으로 지구온난화, 환경오염 등의 문제

로 연료 이용시 온실가스나 대기오염물질이 발생되지 않아 청정에너지로 수소에너지가 주목받고 있다. 수소는 주로 천연가스, 바이오가스로부터의 개질반응을 통하여 생산하거나, 물로부터 전기분해를 통하여 생산하는 방법으로 나뉜다. 전기분해를 통하여 생산하는 방법에는 고온 수증기 전해법, 양성자 교환막전해법(proton exchanger membrane, PEM), 알칼리수전해법(alkaline electrolysis, AE) 등의 방법이 있다. 이 중 고온수증기 전기분해법은 고체산화물연료전지(solid oxide fuel cell, SOFC) 기술을 응용한 것으로 고체산화물전기셀(solid oxide electrolysis cell, SOEC)에서 700-900°C의 고온의 운전조건을 갖는다. 고온의 스팀에서 전기분해되는데 필요한 전기에너지가 낮아지고, 양방향 운전이 가능하다. 이때 700°C의 고온 수증기를 만드는데 열원이 필요하며, 이 열원은 연소로의 연소가스나 신재생에너지 등의 다양한 열원으로부터 얻을 수 있다<sup>1,2)</sup>.

Solid refuse fuel (SRF) 연소로부터 열원을 얻어 고온의 수증기 생산하는데 있어 감압 가열 공정을 거치게 되고 이를 열역학 제1법칙에 기초한 에너지 수지분석방법으로 분석할 수 있다. 그러나 고온, 고압의 물 또는 증기는 감압을 하거나 물을 혼합한다 하더라도 엔탈피 총량에는 변화가 없기 때문에 감압 또는 감온과정에서 에너지 손실이 발생하는 것을 파악하기 어려운 측면이 있다.

현재 공학 분야에서 다루는 열 시스템에서는 대부분의 공정내의 각 흐름들에 대한 엔탈피 계산을 기초로 에너지 손실 및 효율을 정량화하는데 열역학 제1법칙을 적용하고 있다. 그러나 열역학 제1법칙은 에너지의 양적 측면만을 다루며 단지 에너지는 보존된다는 기본 개념에 기초하므로, 공정 내에서 각 흐름 간에 발생하는 에너지의 질적 손실을 정의하고 규명하기에는 한계를 가지고 있다. 이러한 이유로 최근에는 에너지 시스템에 대한 열역학 제2법칙에 의한 분석방법, 즉 엑서지 분석방법이 에너지 기술자와 과학자들 사이에서 더욱 관심을 끌고 있다.

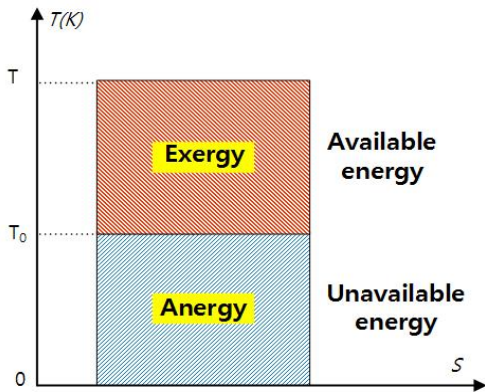
엑서지 분석방법은 열역학 제2법칙과 엔트로피 생산의 비가역성에 대한 개념에 기초하며, 열시스템 분석에 있어서 질량수지, 에너지수지 계산과 병행하여 적용될 수 있고 이를 통하여 시스템 또는 시스템 내 각각의 설비 개선이나 새로운 시스템의 개발에 필요한 엑서지 손실의 발생 지점, 손실량 등을 정의할 수 있다. 엑서지 분석으로부터 에너지의 질적 손실로 인한 시스템 내에서의 효율 손실을 알아낼 수 있으며, 시스템 중의 어느 부분이 효율 개선이 가능하고, 어느 부분 개선을 고려해야 하는지 판단할 수 있다. 이렇게 엑서지 분석을 통하여 질량수지나 에너지수지로부터 알 수 없는 손실 지점의 파악이 가능함에 따라 최근에는 엑서지 분석을 기초로 한 많은 연구들이 전 세계적으로 다양한 분야에서 수행되고 있다<sup>3)</sup>.

본 연구에서는 고온의 스팀을 이용하는 양방향수전해방법으로 수소를 생산하는데 있어서, SRF 연소로의 열원으로부터 700°C의 수증기를 생산하는 네 가지 공정을 PRO/II를 이용하여 공정을 시뮬레이션하고, 이러한 시뮬레이션 결과로부터 엑서지 분석을 통하여 최적 공정을 선정하는데 있다.

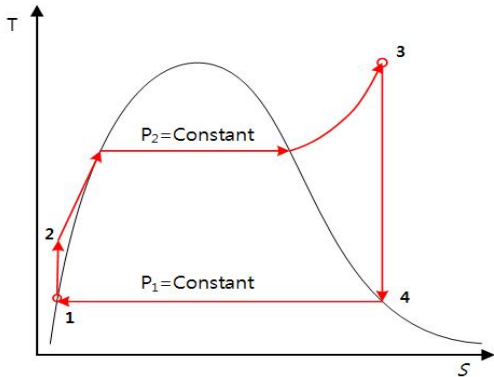
## 2. 이론적 고찰

### 2.1 엑서지(exergy) 이론

엑서지의 개념은 19세기말 Gouy, Stodola 등에 의하여 손실 일에 관한 연구로부터 시작되었으며, 1956년 Rant는 주어진 에너지에서 일로 변환 가능한 부분을 엑서지(exergy), 일로 변환 불가능한 부분을 아니지(anergy)라는 이름을 제안하였다<sup>4)</sup>. Exergy는 고온이나 저온의 에너지원 상태로부터 우리가 생활하고 있는 환경까지 실질적으로 얻을 수 있는 일 형태의 최대 유효 에너지량을 의미한다. 엑서지는 어떤 계(system)가 열역학적 평형상태에 도달할 때까지 최대한 얻을 수 있는 일(work)의 양이다. 엑서지는 핀치기법(pinch technology)과 함께 공정 진단 및 시스템 최적화 설계에서 매우 중요한 인자이



(a) Carnot cycle exergy and energy



(b) Rankine cycle

Fig. 1. The T-S diagram of Exergy and energy

며, 발전, 열병합, 열교환, 냉동, 열펌프, 냉열, 화학 등의 다양한 분야에서 활발히 적용되고 있다. 엑서지율(exergy ratio)은 엑서지와 그 유체가 보유한 에너지와의 비로써, 그 에너지의 유용도를 나타낸다. Fig. 1(a)는 T-s선도에 표시한 Carnot 사이클에 기준 한 exergy값으로 붉은 빗금친 면적이 최대 일로 전환할 수 있는 부분의 에너지량이다. 반면 이용하지 못하고 버려지는 에너지량을 무효 에너지(anergy)라 하며, 에너지 총량은 exergy와 anergy의 합으로 나타내어진다. 즉, exergy는 energy 총량에서 얼마만큼을 일 형태로 유용하게 얻어질 수 있는가의 일(work) 에너지량의 척도인 것이다.

예를 들면, 증기발전소의 랭킨 사이클을 T-s선도에 나타낸다면, Fig. 1(b)가 되고 면적 1-2-3-4-1가 얻어지는 exergy 즉, 유효 일량으로 37% 정도가 되는 것

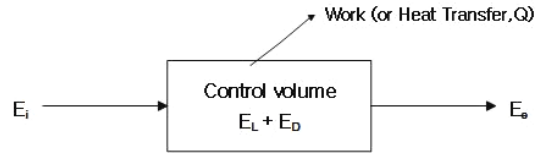


Fig. 2. Exergy configuration in the change of system

이며 아래 부분이 버리는 무효 에너지량이 된다<sup>5)</sup>.

## 2.2 Exergy 산정

물리적 엑서지의 계산<sup>6)</sup>은 실제 및 기준조건( $h, s, h_0, s_0$ )에서의 각 스트림의 엔탈피 및 엔트로피 등의 데이터를 통하여 계산하였다. 기준조건과 스트림의 조건은 Table 1에 제시되었다. 엔탈피( $h_0$ ) 및 엔트로피( $s_0$ ) 값은 압력이 1 bar, 298.15 K (25°C)인 상태에서 동일한 물질의 흐름에 대한 값이며, 물리적 엑서지는 다음과 같이 표현된다. 식 (1)에서 보듯이 깁스자유에너지(Gibbs free energy)와 유사하지만, 엑서지(exergy)는 열역학 시스템에서 추출할 수 있는 사용 가능한 작업량을 설명하는 데 사용되는 일반적인 용어로 깁스자유에너지는 특정 프로세스(즉, 일정한 온도 및 압력)를 위한 용어이다. 그것들은 개념 상으로 관련되어 있다.

$$E^{PH} = (U-U_0) + P_0(V-V_0) - T_0(S-S_0) = (h-h_0) - T_0(s-s_0) \quad (1)$$

$$E_i = E_e + E_L + E_D \quad (2)$$

$E_i$  : 엑서지 유입(inlet of exergy)  
 $E_e$  : 엑서지 유출(outlet of exergy)  
 $E_L$  : 엑서지 손실(loss of exergy)  
 $E_D$  : 엑서지 파괴(destruction of exergy)

계의 변화과정에서 엑서지는 Fig. 2에 나타난 것과 같은 성분들로 계산된다. 엑서지 손실( $E_L$ )은 일 또는 열전달( $Q$ )에 기여하지 못하고 손실되는 엑서지를 의미하며, 엑서지 파괴( $E_D$ )는 마찰 손실 등에 의하여 검사체적(control volume) 내에서 파괴되는

**Table 1.** Condition of temperature and pressure for the simulation of 4-type processes

Process 1				Process 2				
	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>	S <sub>6</sub>	S <sub>7</sub>	S <sub>8</sub>
T (°C)	20	180	168	700	20	180	700	700
P (bar)	1	7	3	3	1	7	7	3
Process 3								
	S <sub>9</sub>	S <sub>10</sub>	S <sub>11</sub>	S <sub>12</sub>	S <sub>13</sub>	S <sub>14</sub>	S <sub>15</sub>	
T (°C)	20	400	400	400	700	400	-	
P (bar)	1	40	40	3	3	40	-	
Process 4								
	S <sub>16</sub>	S <sub>17</sub>	S <sub>18</sub>	S <sub>19</sub>	S <sub>20</sub>	S <sub>21</sub>	S <sub>22</sub>	
T (°C)	20	400	400	700	700	400	-	
P (bar)	1	40	40	40	3	40	-	

엑서지를 의미한다. 이들은 모두 계의 변화과정에서 일 또는 열전달에 기여하지 못한다는 측면에서 사실상 같은 의미를 가진다고 할 수 있다.

앞의 엑서지 이론을 증기 감압(압력변화) 과정과 가열(온도변화) 과정에 적용하면, 각각의 과정에 대한 엑서지는 다음과 같은 성분들로 표현할 수 있다. 압력변화에서의 엑서지 계산은 다음과 같다.

$$E_i = W + E_e + E_L \quad (3)$$

즉, 엑서지 입력( $E_i$ )은 최대가용한 일( $W$ )과 엑서지 출력( $E_e$ ) 및 엑서지 손실( $E_L$ )의 합으로 표현된다. 온도변화에서의 엑서지 계산은 다음과 같다.

$$E_p = E_h + E_c + E_e + E_L \quad (4)$$

여기서, 각각  $E_p$ 는 엑서지 생산,  $E_h$ 는 고온흐름의 엑서지 값,  $E_c$ 는 저온흐름의 엑서지 값을 나타내며,  $E_L$ 은 고온흐름과 저온흐름의 혼합지점에서 발생하는 엑서지 손실을 나타낸다.

운동에너지와 위치에너지에 의한 엑서지는 무시하였으며,  $P$ ,  $T$ ,  $m$ ,  $e$ 는 각각 압력, 온도, 유량, 엑서지값을 나타내며, 하첨자는 증기공급 과정에

서의 각 흐름을 의미하는 것으로 이들에 대한 상대 값을 Table 1에 나타냈다.

### 3. 연소시스템의 공정 및 시뮬레이션

#### 3.1 연소시스템의 공정

연소시스템의 보일러에서 발생한 180°C, 7 bar 스팀을 700°C, 3 bar 스팀을 생산하는데 에너지측면에서 가장 효율적인 방법을 찾기 위해서 다음 네 가지 공정으로 분석하였다. ① 감압밸브에서 180°C, 3 bar 스팀으로 압력을 낮추고 과열기로부터 700°C, 3 bar 스팀을 생산하는 공정, ② 180°C, 7 bar 스팀을 과열기에 의한 700°C, 7 bar로 가열한 후 감압밸브로 700°C, 3 bar로 감압하는 공정, ③ 180°C, 7 bar 스팀을 400°C, 40 bar로 가압, 가열하여 스팀을 터빈을 통하여 전기를 생산하고, 남은 스팀은 감압밸브에 의하여 400°C, 3 bar로 감압한 후 과열기로 700°C, 3 bar로 가열하는 공정 그리고 ④ 180°C, 7 bar 스팀을 400°C, 40 bar로 가열, 가압한 후 스팀을 터빈을 통하여 전기를 생산하고, 남은 스팀은 과열기에 의하여 다시 700°C, 40 bar로 가열한 후 700°C, 3 bar로 감압하는 공정과 같이 네 가지로 나누어 공정을 분석, 실시하였다. 연소시스템 모델은 1) 연소시스템의 설비는 정상 상태에서 운전된다. 2) 모든 부품은 열 손실 없이 작동한다. 3) 터빈과 과열기로 보내는 질량 유량비는 3:1로 하였다. 4) Turbine의 작동효율은 80%로 가정하였다<sup>7)</sup>.

연소시스템 내 보일러와 과열기에 대한 네 가지 공정의 온도와 압력조건을 stream lines ( $s_{si}$ )별로 Table 1에 나타냈으며, Fig. 3에는 공정별로 stream lines ( $s_{si}$ ), 질량( $m_{si}$ ), 엔탈피( $h_{si}$ ), 엑서지( $e_{si}$ )를 나타냈다. 또한 모델에서 사용된 E1-E8은 열교환기이며, V1-V4는 압력을 낮추는데 사용한 Throttle 밸브를 나타낸다.

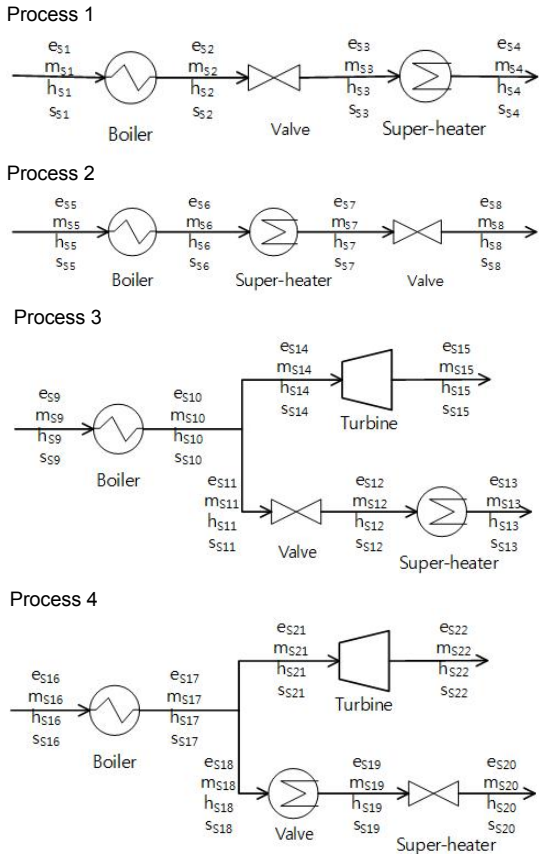


Fig. 3. The description of 4-type processes

### 3.2 연소시스템 공정의 모델링 및 시뮬레이션

연소시스템은 PRO/II with provision (9.4 ver)에 의한 공정모사를 하였으며, 해석에 사용되는 열역학식은 Soave- Redlich-Kwong 방정식이 사용되었다. 상기에서 언급한 조건에서 연소시스템 내 보일러와 과열기에서의 네 가지 형태의 공정 모델링을 Fig. 4에 나타냈다.

앞서 작성한 모델링으로부터 시뮬레이션하여 공정조건에 따른 엔탈피와 엔트로피를 Table 2과 Table 3과 같은 결과를 얻었다.

앞서 언급한 것처럼 공정 1과 2는 동일한 조건에서 감압과 가열공정의 순서를 변경하였을 때 엔탈피와 엔트로피 변화를 분석하여 Table 2에 나타냈으며, 공정 3과 4는 연소기에 발생한 스팀의 일

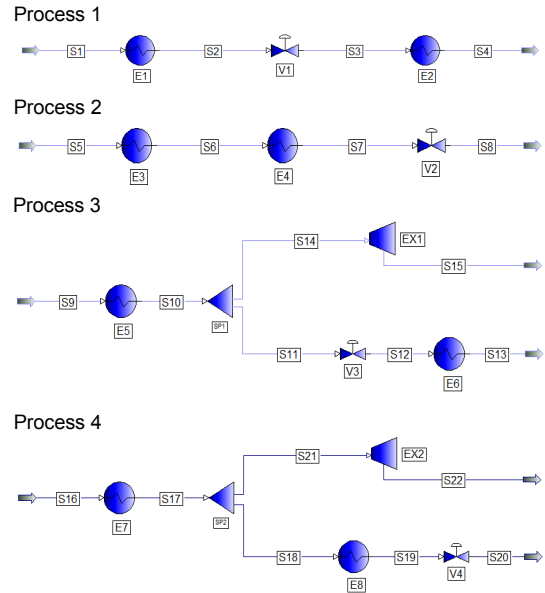


Fig. 4. The modeling of 4-type processes

Table 2. The entropy and enthalpy values for every streams of process 1 and process 2 (flow rate=100 kg/hr)

Unit	Stream	Temp. °C	Press. bar	Entropy kJ/kg*K	Enthalpy kJ/kg	
Standard		25	1	5.025	111.23	
P r o c e s s 1	Boiler	S1	25	1	5.025	111.23
		S2	180	7	11.51	2,833.02
	Valve	S2	180	7	11.51	2,833.02
		S3	173.85	3	11.89	2,833.02
Super heater	S3	173.85	3	11.89	2,833.02	
	S4	700	3	13.51	3,940.19	
P r o c e s s 2	Boiler	S5	25	1	5.03	111.23
		S6	180	7	11.51	2,833.02
	Super heater	S6	180	7	11.51	2,833.02
		S7	700	7	13.12	3,937.24
Valve	S7	700	7	13.12	3,937.24	
	S8	698.71	3	13.51	3,937.24	

부를 발전으로 활용하는 전제조건에서 엔탈피와 엔트로피 변화를 분석하여 Table 3에 나타냈다.

Table 3에서 700°C까지 가열 후 3 bar로 감압하는 공정에서 감압 후 스팀의 온도가 700°C에 미치지 못하고 약 12°C 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

**Table 3.** The entropy and enthalpy values for every steams of process 3 and process 4

Unit	Stream	Flow rate kg/hr	Temp. °C	Press. bar	Entropy kJ/kg*K	Enthalpy kJ/kg	
Standard		1	25	1	5.025	111.23	
Process 3	Boiler	S9	100	25	1	5.025	111.23
		S10	100	400	40	11.452	3,227.25
	Valve	S11	25	400	40	11.452	3,227.25
		S12	25	370.67	3	12.622	3,227.25
	Super heater	S12	25	370.67	3	12.622	3,227.25
		S13	25	700	3	13.514	3,940.19
	Turbine	S14	75	400	40	11.452	3,227.25
S15		75	115.23	1.7	11.889	2,554.05	
Process 4	Boiler	S16	100	25	1	5.025	111.23
		S17	100	400	40	11.452	3,227.25
	Super heater	S18	25	400	40	11.452	3,227.25
		S19	25	700	40	12.293	3,912.97
	Valve	S19	25	700	40	12.293	3,912.97
		S20	25	688.02	3	13.485	3,912.97
	Turbine	S21	75	400	40	11.452	3,227.25
S22		75	115.23	1.7	11.889	2,554.05	

## 4. 엑서지 분석 및 결과

### 4.1 각 공정의 엑서지 해석

식 (1)에서와 같이 물리적 엑서지는 기준 상태에 대한 계의 온도, 압력변화로부터 얻어지는 일이다. 질량유량이  $m$ 이 흐르는 공정의 Stream  $n$ 의 물리적 엑서지( $En^{PH}$ )를 다음 식과 같이 계산할 수 있다.

$$En^{PH} = m*[(h_n-h_o)-T_o(s_n-s_o)] = m*e_n \quad (5)$$

이러한 방법에 의하여 process 1에 대한 질량 및 엑서지 수지식으로부터 엑서지 손실은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$(m*e_{s1}) + m*(h_{s2}-h_{s1}) - (m*e_{s2})= E_{L1} \quad (6)$$

$$(m*e_{s2}) - (m*e_{s3}) = E_{L2} \quad (7)$$

$$(m*e_{s3}) + m*(h_{s4}-h_{s3}) - (m*e_{s4})= E_{L3} \quad (8)$$

Process 2의 엑서지 손실은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$(m*e_{s5}) + m*(h_{s6}-h_{s5}) - (m*e_{s6})= E_{L4} \quad (9)$$

$$(m*e_{s6}) + m*(h_{s7}-h_{s6}) - (m*e_{s7})= E_{L5} \quad (10)$$

$$(m*e_{s7}) - (m*e_{s8}) = E_{L6} \quad (11)$$

Process 3의 엑서지 손실은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$(m_{s9}*e_{s9}) + m_{s9}*(h_{s9}-h_{s10})-(m_{s10}*e_{s10})=E_L \quad (12)$$

$$(m_{s11}*e_{s11}) - (m_{s1}*e_{s12}) = E_{L8} \quad (13)$$

$$(m_{s13}*e_{s13})+m_{s12}*(h_{s13}-h_{s12})-(m_{s13}*e_{s13})=E_{L9} \quad (14)$$

$$m* \{h_{s15}-h_{s14}-T_o(s_{s15}-s_{s14})\}-m*(h_{s15}-h_{s14}) = E_{L10} \quad (15)$$

Process 4의 엑서지 손실은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$(m_{s16}*e_{s16})+m_{s16}*(h_{s16}-h_{s17})-(m_{s17}*e_{s17})=E_{L1} \quad (16)$$

$$(m_{s20}*e_{s20})+m_{s19}*(h_{s20}-h_{s19})-(m_{s20}*e_{s20})=E_{L12} \quad (17)$$

$$(m_{s18}*e_{s18})-(m_{s19}*e_{s19}) =E_{L13} \quad (18)$$

$$m* \{h_{s22}-h_{s21}-T_o(s_{s22}-s_{s21})\}-m*(h_{s22}-h_{s21})=E_{L14} \quad (19)$$

한편, 주어진 에너지에 대한 유용한 일의 비로서 이 값이 에너지의 질 또는 가치를 나타내며, 수식은 다음과 같이 표현된다<sup>8)</sup>.

$$\epsilon = \frac{e}{h-h_o} = 1 - \frac{T_o(s-s_o)}{h-h_o} \quad (20)$$

**Table 4.** The exergy values for all streams of process 1 and process 2

Process 1		Process 2	
Items	Exergy (kJ/kg)	Items	Exergy (kJ/kg)
ES <sub>1</sub>	0	ES <sub>5</sub>	0
ES <sub>2</sub>	788.97	ES <sub>6</sub>	788.90
ES <sub>3</sub>	675.13	ES <sub>7</sub>	1,413.70
ES <sub>4</sub>	1,299.20	ES <sub>8</sub>	1,297.50

**Table 5.** The exergy values for all streams of process 3 and process 4

Process 3		Process 4	
Items	Exergy (kJ/hr)	Items	Exergy (kJ/hr)
ES <sub>9</sub>	0	ES <sub>16</sub>	0
ES <sub>10</sub>	1,200.8	ES <sub>17</sub>	1,200.8
ES <sub>11</sub>	30,019.4	ES <sub>18</sub>	30,019.4
ES <sub>12</sub>	21,302.9	ES <sub>19</sub>	40,897.0
ES <sub>13</sub>	32,480.9	ES <sub>20</sub>	32,016.6
ES <sub>14</sub>	90,058.2	ES <sub>21</sub>	90,058.2
ES <sub>15</sub>	29,798.0	ES <sub>22</sub>	29,798.0
Power	11.22 kW	Power	11.22 kW

## 4.2 각 공정의 엑서지 분석

Table 2와 Table 3의 물성치를 사용하여 엑서지 수지 식 (4)-(17)으로부터 각 공정의 엑서지를 구하여 Table 4와 Table 5에 나타냈다. 이로부터 각각의 스트림에서 감압과 가열 등의 공정을 거치면서 손실되는 엑서지의 양을 구하고, 이를 합한 결과를 연소시스템의 총 엑서지 손실량으로 Table 6과 Table 7에 나타냈다. Table 7에서 보는 바와 같이 감압 후 가열하는 process 1에서 발생하는 총 엑서지 손실량이 252,972.2 kJ/hr이고, 가열 후 감압하는 process 2의 총 엑서지 손실량은 252,853 kJ/hr으로 나타났으며, 두 공정에서는 가열 후 감압하는 것이 손실되는 엑서지의 양이 적으나, 약 119.2 kJ/hr로 많은 차이는 나지 않았다.

스팀의 일부를 터빈으로 보내 발전에 활용하고 나머지 스팀을 생산하는 공정에서는 감압 후 가열하는 process 3에서의 총 엑서지 손실량은 226,754.82 kJ/hr

**Table 6.** The exergy loss values for the process 1 and process 2

Process 1		Process 2	
Items	Exergy (kJ/hr)	Items	Exergy (kJ/hr)
E <sub>L1</sub>	193,282.8	E <sub>L4</sub>	193,282.8
E <sub>L2</sub>	11,383.6	E <sub>L5</sub>	47,948.2
E <sub>L3</sub>	48,305.0	E <sub>L6</sub>	11,622.0
Total	252,972.2	Total	252,853.0

**Table 7.** The exergy values for every streams of process 3 and process 4

Process 3		Process 4	
Items	Exergy (kJ/hr)	Items	Exergy (kJ/hr)
E <sub>L7</sub>	191,524.6	E <sub>L11</sub>	191,524.6
E <sub>L8</sub>	8,716.5	E <sub>L12</sub>	6,265.5
E <sub>L9</sub>	6,645.4	E <sub>L13</sub>	8,880.4
E <sub>L10</sub>	19,868.3	E <sub>L14</sub>	19,868.3
Total	226,754.8	Total	226,538.8

**Table 8.** The result of reducing exergy losses

Items	Process 1	Process 2	Process 3	Process 4
Ratio of exergy ( $\epsilon$ )	0.07	0.07	0.27	0.27
Reduction of exergy losses (kJ/hr)	Basis	119.2	26,217	26,433

이고, 가열 후 감압하는 process 4에서의 총 엑서지 손실량은 226,538.77 kJ/hr으로 나타났으며, 이는 process 1, 2에 비하여 엑서지 손실량이 약 26,000 kJ/hr 정도 적게 낮으며, 앞서 공정과 같이 가열 후 감압하는 process 4가 엑서지 손실량이 약 216 kJ/hr로 적게 나타나는 결과를 얻었다.

연소시스템의 4가지 공정에서 process 1를 기준하여 다른 공정과의 엑서지 손실의 차이 양과 엑서지율을 비교하여 Table 8에 나타냈다. 엑서지율에서는 process 1-2와 같고, process 3-4가 같다. process 1-2에 비하여 process 3-4가 약 0.2 정도 크게 나타났으며, 엑서지 손실량 측면에서는 process 1 > process 2 > process 3 > process 4 순서로 나타났으며, 따라서 process 4의 경우가 에너지 손실량이 가장 적어서 유용에너지가 가장 높은 공정

으로 사료된다.

## 5. 결론

SRF 연소로에 의한 양방향수전해용 스팀 180°C, 7 bar에서 700°C, 3 bar의 스팀을 생산하기 위한 최적 공정 선정을 위한 엑서지 분석 결과는 다음과 같다.

1) Process 1-4의 엑서지 분석 비교시 스팀발전은 추가한 process 3-4가 약 26,000 kJ/hr 정도 엑서지 손실량이 적게 나와서 유용한 에너지가 높은 공정이다. 이는 11.22 kW 발전량에 의하여 생산되는 엑서지 양으로 인한 것으로 사료된다.

2) 가열 후 감압하는 공정과 감압 후 가열공정과의 엑서지 분석 비교하였을 때 모든 공정에서 가열 후 감압하는 공정이 엑서지 손실이 적게 나타났다으며, 엑서지 손실 차이량이 process 1-2에서는 약 119.2 kJ/hr와 process 3-4에서는 약 216 kJ/hr로 크게 나지 않는다.

3) Process 4에서 가열된 후 감압하면서 온도가 떨어짐에 따라 스팀의 온도가 700°C보다 약 12°C가 떨어지는 단점이 있다. 700°C 이상의 고온의 스팀을 필요로 하는 경우엔 추가적인 열이 필요할 것으로 보인다.

4) 종합적으로 볼 때 감압과 가열의 순서에는 큰 영향이 없으며, process 1 < process 2 < process 3 < process 4 순서로 효율적인 공정으로 사료된다.

## 후 기

본 연구는 환경정책기반공공기술개발사업 중 자원순환정책 대응기술(2016000710007)에서 지원 받았다.

## References

1. T. Lee, "Electrolysis equipment technology overview and Outlook", Journal of the Electric World, Special Issue March, pp. 14-17.
2. S. K. Woo, J. H. Yoo, and S. B. Moon, "High Efficiency Electrolysis", News & Information for Chemical Engineers, Vol. 27, No. 4, 2009, pp. 429-433.
3. M. J. Moran, H. N. Shapiro, D. D. Boettner, and M. B. Bailey, "Fundamentals of Engineering Thermodynamics", 4th edition, John Wiley & Sons., 2001.
4. D. J. Kim and D. B. Kim, "Consideration of exergy and exergy ratio on T-s chart of water", The Society of Air-conditioning and Refrigerating Engineers, 2009, pp. 0827-0832.
5. S. K. Yoon, "Exergy analysis of LNG cold energy", The Society of Air-conditioning and Refrigerating Engineers, 2015, pp. 17-37.
6. J. Y. Yi and C. Lee, "The analysis on exergy Loss and its reduction methods in steam desuperheating and depressurizing process", The KSEF Journal of Fluid Machinery, Vol. 18, No. 6, 2015, pp. 19-26.
7. G. S. Lee, "Design and exergy analysis for a combined cycle using LNG cold/hot energy", The Society of Air-conditioning and Refrigerating Engineers, 2005, pp. 285-296.
8. A. Ghannadzadeh, "Exergetic Balances and Analysis in a Process Simulator: A Way to Enhance Process Energy Integration", Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2012, pp. 33-55.